

ОБРАБОТКА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.А. МИТРОФАНОВ, Е.А. ЧАЩИН, С.А. БАЛАШОВА, кандидаты техн. наук

Приводятся результаты исследования воздействия лазерного излучения на газотермическое керамическое покрытие на основе Al_2O_3 . Показано, что лазерная обработка, сопровождающаяся оплавлением поверхностного слоя, приводит к повышению эксплуатационных свойств покрытия.

Ключевые слова: лазерная поверхностная обработка, плотность энергии лазерного излучения, режимы лазерного воздействия, прочность сцепления, металлографическое исследование, микроструктура покрытия.

GAS-THERMAL COATINGS TREATMENT WITH USING LASER LIGHT

A.A. MITROFANOV, Candidate of Engineering, Y.A. CHASHCHIN, Candidate of Engineering, S.A. BALASHOVA, Candidate of Engineering

The authors give the research results of laser light effect on a gas-thermal ceramic coating based on Al_2O_3 . The article shows that the laser treatment with flash-off of surface layer causes the increasing operating properties of a coating.

Keywords: laser surface treatment, energy density of laser light, laser effect modes, cohesive resistance, metallographic research, coating microstructure.

Повышение ресурса работы деталей машин достаточно успешно достигается путем нанесения плазменных покрытий на основе металлических и неметаллических компонентов, которые обладают необходимым комплексом эксплуатационных свойств, таких как теплостойкость, износостойкость и коррозионная стойкость [1–3]. Несмотря на достигнутые успехи в развитии технологии плазменного напыления покрытий, существует проблема обеспечения стабильности свойств и качества получаемых покрытий, в частности таких свойств, как адгезионная прочность и пористость.

Теплозащитная способность покрытия определяется не только свойствами самого материала, но и его пористостью. Так, с увеличением пористости увеличиваются теплозащитные свойства покрытия, например термостойкость, улучшается сопротивляемость растрескиванию, особенно при термоциклических нагрузках. С другой стороны, развитая наружная и внутренняя пористость облегчает возможность проникновения атмосферных газов, главным образом атомарного кислорода, через покрытие к поверхности металлической основы [5]. Таким образом, возникает необходимость получения заданного уровня пористости, при котором обеспечиваются теплозащитные свойства покрытия и его коррозионная стойкость. Сочетание этих свойств возможно при формировании покрытия с пористостью, изменяющейся по его глубине. Достигнуть требуемого сочетания возможно за счет оплавления поверхностного слоя, в частности используя лазерное излучение. Лазерное излучение, обладая высокой плотностью подводимой энергии, широко используется в различных технологических процессах, в том числе и для обработки поверхностных слоев [4].

Для получения покрытий с более высокими эксплуатационными характеристиками в качестве метода высокотемпературной обработки газотермических покрытий был исследован нагрев лазерным излучением в импульсном режиме. В работах, проведенных ранее [5, 6], была показана принципиальная возможность такого подхода. Однако необходимо разработать научно обоснованную методику определения оптимальных режимов лазерной обработки.

Определение параметров лазерной обработки основано на определении температуры на поверхности покрытия и ее распределении по глубине. При рассмотрении лазерного луча как распределенного поверхностного теплового источника нахождение температурных полей сводится к решению классического уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = -\frac{q_n(z,t)}{\lambda}, \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; $T(z, t)$ – температурное поле, распределенное по глубине проникновения z ; $q_n(z, t)$ – интенсивность тепловыделения на облучаемой поверхности.

Результаты аналитических решений уравнения теплопроводности позволяют оценить следующие параметры процесса:

- абсолютные значения температур в зоне обработки на стадиях нагрева и охлаждения;
- размеры зоны оплавления покрытия;
- скорость нагрева зоны обработки.

При равномерном распределении энергии по лазерному пятну с использованием коротких импульсов длительностью $\tau_i \leq r_n / a$ задача теплопроводности может рассматриваться в од-

номерном приближении на поверхности полубесконечного тела.

Общим решением дифференциального уравнения в линейной постановке является выражение

$$T(z,t) = \frac{2q_n \sqrt{at}}{\lambda} \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) + T_0, \quad (2)$$

где $\operatorname{ierfc}(x) = \int_x^\infty (1 - \operatorname{erf}(y)) dy$ – функция интеграла вероятности; $\operatorname{erf}(y)$ – функция ошибки; T_0 – начальная температура обрабатываемой поверхности.

Для малых значений времени $0 < t < \tau_i$ температура на поверхности облучаемого материала может быть приближенно определена из выражения

$$T(0,t) = \frac{2q_n}{\lambda} \sqrt{\frac{at}{\pi}} + T_0. \quad (3)$$

На рис. 1 представлена зависимость температуры поверхности покрытия при воздействии лазерным излучением с различной плотностью энергии. Полученные результаты позволяют определить интервал режимов лазерного воздействия. Нижняя граница интервала плотности энергии лазерного излучения соответствует условию формирования на поверхности покрытия температуры плавления ($t_{пл}$) керамического покрытия Al_2O_3 , верхняя – температуре кипения ($t_{кип}$). Обработка с плотностью энергии, превышающей данное значение, приведет к испарению поверхностных слоев покрытия.

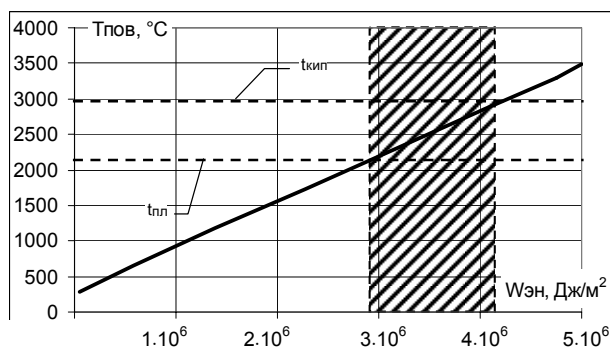


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности покрытия от плотности энергии лазерного излучения

Практический интерес представляет определение распределения температурных полей по глубине поверхностного слоя при лазерной обработке импульсным излучением. В первом приближении можно считать, что глубина такого слоя определяется размером зоны, в которой в результате лазерного воздействия была достигнута критическая температура упрочнения $T_{упр}$. Использование выражения (1) для этой цели затруднительно в связи с большим объемом вычислений.

В этом случае удобно пользоваться выражением для вычисления температур в неявном виде, полученном при допущении $r_n \gg \sqrt{at}$:

$$T(z,t) = \frac{q_n}{\lambda} \left(2\sqrt{\frac{at}{\pi}} - z \right). \quad (4)$$

Из выражения (4) возможно получить зависимость для определения глубины оплавленного слоя при лазерном воздействии импульсом длительностью τ_i :

$$Z_{опл} = 2\sqrt{\frac{a\tau_i}{\pi}} - \frac{T_{возд}\lambda}{q_n}. \quad (5)$$

Результаты расчета (рис. 2) позволяют оценить температуру не только на поверхности покрытия, но и на границе раздела «подложка–покрытие». Таким образом решается задача выбора толщины покрытия, при котором температура поверхности подложки находилась в пределах температуры плавления. При выполнении этого условия будет увеличиваться прочность адгезионного сцепления за счет диффузионных процессов на границе раздела.

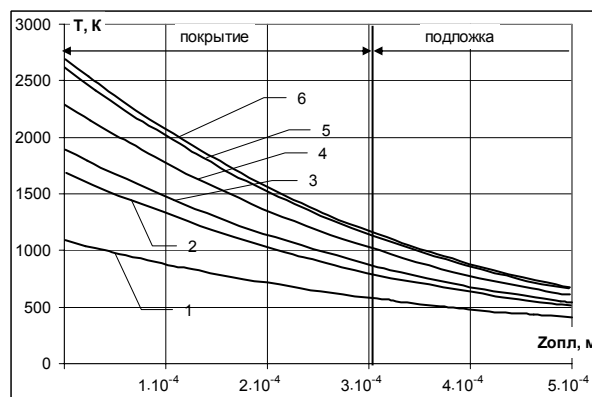


Рис. 2. Графики распространения температурных полей в покрытии для различных значений энергии импульса: 1 – $W_i = 20$ Дж; 2 – $W_i = 35$ Дж; 3 – $W_i = 40$ Дж; 4 – $W_i = 50$ Дж; 5 – $W_i = 58$ Дж; 6 – $W_i = 60$ Дж

При выполнении экспериментальных исследований на подложку из легированной конструкционной стали 30ХН2МФА с использованием установки «Киев-7» наносилось керамическое покрытие на основе Al_2O_3 , толщина покрытия составляла ~ 300 мкм. Дисперсность частиц порошка составляла 20–40 мкм. Лазерная обработка поверхности выполнялась по нескольким режимам на импульсной лазерной установке «Квант-18» с изменением энергии импульса в интервале $W_i = 16$ –60 Дж, с оплавлением и без оплавления поверхности. Для оценки воздействия лазерного излучения на покрытие проводились металлографические исследования.

В микроструктуре покрытия на основе Al_2O_3 до лазерного воздействия (рис. 3,а) отчетливо выделяются темные включения неправильной формы, которые можно идентифици-

ровать как поры, возникающие при формировании покрытия, количество темных зон увеличивается по мере приближения к поверхности покрытия.

В результате лазерной обработки с максимальным значением энергии импульса рассматриваемого диапазона ($W = 60$ Дж) произошли серьезные изменения в микроструктуре покрытия (рис. 3, б). По периферии зоны лазерного воздействия формируются белые включения с отсутствием темных. В центральной части зоны лазерного воздействия произошло уменьшение толщины покрытия за счет его частичного испарения. Этот процесс также сопровождается уменьшением площади, занимаемой темными включениями. Указанные явления в поверхностных слоях покрытия связаны с тем, что распределение плотности энергии лазерного излучения по диаметру пятна близко к нормальному закону. Полученные результаты показывают, что воздействие лазерного излучения приводит к уменьшению пористости керамического покрытия.

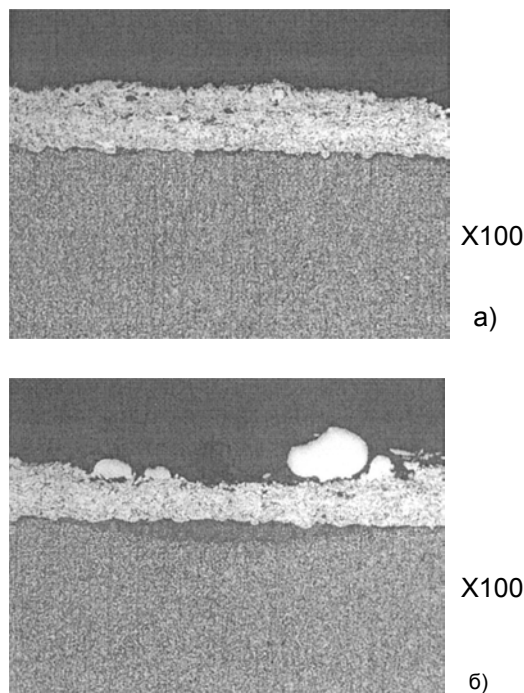


Рис. 3. Микроструктура плазменного покрытия на основе Al_2O_3 : а – исходное состояние; б – после лазерной обработки с оплавлением поверхности ($W = 60$ Дж)

Кроме того, в поверхностном слое подложки в результате лазерного воздействия формируется зона термического воздействия с максимальной толщиной ~ 100 мкм (рис. 3, б) (темная зона под покрытием). Это подтверждает то, что по границе раздела «подложка-покрытие» возникают достаточно высокие температуры (рис. 2), которые должны обеспечить возникновение диффузионных процессов, приводящих к повышению прочности адгезионного сцепления.

Проведенные исследования показали, что при лазерной обработке керамических покрытий

возникает ряд технологических вопросов, вызванных незначительным интервалом между температурой плавления и кипения Al_2O_3 при их высоких значениях ($t_{пл} = 2045$ °С, $t_{кип} = 2980$ °С), по сравнению с металлами и их сплавами. Это сужает диапазон параметров лазерного воздействия и приводит к тому, что нестабильность параметров, приводящая к возникновению на поверхности покрытия температуры выше температуры кипения, может вызывать полное испарение покрытия в зоне лазерного воздействия (рис. 4).

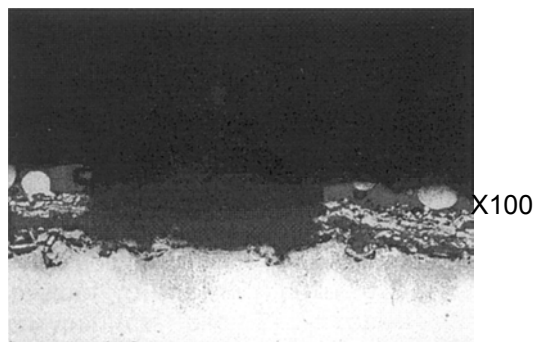


Рис. 4. Зона полного испарения плазменного покрытия на основе Al_2O_3 после лазерного воздействия

При измерении микротвердости керамического покрытия было установлено, что ее значение составляет $H = 13000$ – 13500 МПа и не изменяется в результате лазерного воздействия.

Заключение

Лазерная обработка с оплавлением поверхностного слоя приводит к улучшению таких эксплуатационных свойств покрытия, как пористость и прочность адгезионного сцепления. Существует диапазон значений параметров лазерного излучения, которые обеспечивают стабильность свойств получаемых покрытий.

Список литературы

1. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. – М.: Наука, 1977.
2. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозиов». – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003.
3. Хасуй А., Моригаки О. Наплавка и напыление. – М.: Машиностроение, 1985.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисуров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
5. Обработка лазерным излучением напыленных керамических покрытий / Е.А. Чашин, А.В. Федин, А.А. Митрофанов, И.В. Шилов // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т. 10: сб. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф. «Исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности» / под ред. А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 158–159.
6. Митрофанов А.А., Гуцин К.А. Исследование воздействия лазерного излучения на свойства керамических покрытий, нанесенных газотермическим методом // Вооружение. Технология. Безопасность. Управление: мат-лы III науч.-техн. конф. аспирантов и молодых ученых. В 3 ч. Ч. 2. – Ковров: КГТА, 2008. – С. 24–28.

Митрофанов Андрей Анатольевич

ГОУВПО «Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева»,
кандидат технических наук, доцент кафедры лазерной физики и технологии,
телефон (49232)3-13-47.

Чашин Евгений Анатольевич

ГОУВПО «Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева»,
кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой электротехники,
телефон (49232)3-20-62,
e-mail: kanircha@list.ru

Балашова Светлана Александровна

ГОУВПО «Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева»,
кандидат технических наук, ассистент кафедры электротехники,
телефон (49232)3-20-62,
e-mail: kanircha@list.ru